

基于三维网络模型的水驱油微观渗流机理研究¹⁾

侯 健^{*,2)} 李振泉^{**} 关继腾[†] 王克文[†] 陈月明^{*}

^{*}(中国石油大学石油工程学院, 东营 257061)

^{**}(中石化胜利油田有限公司地质科学研究院, 东营 257015)

[†](中国石油大学物理科学与技术学院, 东营 257061)

摘要 利用逾渗网络模型在微观水平进行随机模拟来研究水驱油的微观渗流规律, 通过模型计算结果与油水稳态相对渗透率驱替实验结果对比验证了网络模拟的有效性. 在此基础上, 讨论了在不同润湿条件下、水驱不同阶段的剩余油微观分布规律. 将剩余油分布形态归纳为 4 种状态: 孤粒 / 孤滴状、斑块状、网络状和油水混合状态. 研究表明, 网络状剩余油的块数较少, 但所占体积比例较大. 随着剩余油饱和度的降低, 最大网络状油所占孔隙数减少, 剩余油饱和度在 40%~50% 附近开始以较快速度减少. 润湿性不仅影响驱油效率, 也影响剩余油分布形态. 在驱替过程中, 剩余油分布总的变化趋势是逐渐趋于分散.

关键词 水驱油, 微观模拟, 渗流机理, 网络模型, 剩余油

中图分类号: TE313.7 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2005)06-0783-05

引 言

进行水驱油渗流机理研究对于改善油田开发效果, 提高原油采收率具有重要意义. 自从 1956 年 Fatt 提出网络模型以后, 网络模型已成为研究储层岩石微观孔隙结构与宏观渗流特性的重要手段. 1957 年 Broadbent 和 Hammersley 首次提出逾渗的概念, 并指出了逾渗模型用于研究渗流过程的发展前景. 此后, 该模型逐渐引起了人们的重视, 1972 年 Torelli 和 Scheidegger 首次将其用于孔隙介质中流动和扩散的建模. Levine 等讨论了逾渗模型在孔隙介质中润湿与非润湿现象中的应用, 并进一步说明了如何将有效介质理论用于孔隙介质渗透率的计算. Lenormand 提出了入侵逾渗模型, 用于对孔隙介质中一种液体对另一种液体的驱替过程进行建模.

逾渗网络模型是在微观水平进行随机模拟来研究孔隙介质中的渗流规律^[1]. 与微观室内实验相比, 微观模拟具有可重复性、可控制性的特点, 适合于开展对特定问题的研究. 本文在建立油水两相流三维网络模型的基础上, 进行了水驱油微观渗流机理研究. 讨论了在不同润湿条件下, 水驱不同阶段的剩余油微观分布规律.

1 网络模型的建立

在微观模拟中, 很多研究者将真实储层岩石的孔隙简单地抽象为由圆柱形孔喉相互连接而成的网络. 这种处理影响了毛细管压力计算的准确性, 同时也存在一个很大的缺陷: 在某一时刻, 圆形截面的孔隙中只能允许有一相流体存在. 而真实岩石的孔隙空间是极不规则的, 存在着许多角隅和小的裂隙, 由于毛细管压力的作用, 即使孔隙中间的流体被非湿相驱替, 在角隅和裂缝中仍然会残留一部分湿相流体. 为了考虑水湿层对渗流过程的影响, 提出了采用非圆形截面的孔隙. 本文采用 Mason 等人^[2]提出的形状因子 G 来描述孔隙截面的几何形状. 形状因子 G 定义为

$$G = \frac{A}{P^2} \quad (1)$$

式中, A 为某元素 (孔隙或喉道) 截面面积, P 为周长. 由式 (1) 可知圆的形状因子 $G = \frac{\pi r^2}{(2\pi r)^2} = \frac{1}{4\pi} = 0.0796$, 正方形元素的形状因子为 0.0625, 三角形元素的形状因子的变化范围是 0.0 ~ 0.0481. 孔隙形状越规则, 形状因子就越大, 圆的形状因子最大.

网络模型由孔隙体和喉道组成, 孔隙体代表比较大的孔隙空间, 喉道代表相对狭长的孔隙空间.

2004-09-13 收到第 1 稿, 2005-06-08 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (10302021).

2) E-mail: houjian@hdpu.edu.cn

用截断式威布尔分布表示喉道半径 r_t 分布, 而孔隙半径 r_p 可通过设定孔隙半径与喉道半径的表现比值来确定.

2 油水两相流微观模拟

假设孔隙内的流体为不可压缩、不混溶. 模拟时为消除末端效应, 网络入口的一端同含有驱替流体的储层相连, 网络出口的一端同含有被驱替流体的储层相连, 中间部分为模拟微观渗流过程以及求解宏观参数的测试区.

初始状态下, 网络被水充满呈强水湿性. 利用初次排驱过程模拟原油运移形成油藏过程, 当原油侵入网络后, 部分网络的润湿性发生改变. 初次排驱后进行吸吮, 模拟一次水驱过程.

2.1 初次排驱

在排驱开始之前, 网络饱含被驱替流体 (水), 排驱开始时, 从入口端注入驱替流体 (油), 并逐渐增大驱替流体的压力, 使其逐渐进入网络驱替被驱替流体, 直到预先给定的含水饱和度或者毛细管压力达到为止. 驱替过程中的每一步采用侵入逾渗算法^[3]: 选择具有最低进入毛细管压力的元素 (孔隙或喉道) 进行驱替. 由 MS-P 方法, 进入毛细管压力为

$$P_c = \frac{\sigma_{ow}(1 + 2\sqrt{\pi G}) \cos \theta_r}{r} F_d(\theta_r, G) \quad (2)$$

式中, r 为管壁内半径, σ_{ow} 为油水界面张力, θ_r 为后退角, F_d 是关于 θ_r 和 G 的函数.

在模拟过程中, 对强水湿系统如取 $\theta_r = 0^\circ$, $F_d = 1$, 而圆形截面的形状因子 $G = \frac{1}{4\pi}$, 式 (2) 可以简化为常见的圆柱毛细管压力公式表示为

$$P_c = \frac{2\sigma_{ow} \cos \theta_r}{r} \quad (3)$$

对于截面为多边形的元素 (如三角形、正方形), 即使被油排驱后, 仍然有一部分水残留在角隅中, 这一部分水保证了网络中的水总能够找到通向出口的路径. 随着毛细管压力的升高, 角隅中的水将逐渐减少, 直到达到最后的残余饱和度为止. 如果再增大压力, 各相的饱和度几乎不再有任何改变.

在初次排驱结束时, 孔隙、喉道中的油水分布以及水湿性的变化可能出现 3 种情况^[4]: (1) 小孔隙或者喉道仍然完全饱和水, 这部分孔隙表面仍为水湿; (2) 有油进入的大孔隙或者喉道, 表面有厚的

水层存在, 这部分孔隙表面仍为水湿; (3) 孔隙或者喉道中含有油, 没有厚的含水层, 此时将有一部分孔隙表面变为油湿.

2.2 吸吮 (一次水驱)

初次排驱结束后进行水驱油的吸吮过程. 由于经过初次排驱之后, 部分孔隙表面的水湿性发生了改变, 而且有些角隅中还残留有水, 因而水驱的力学机制比初次排驱复杂得多. Lenormand 等^[5]描述了在水湿和部分水湿系统中孔隙规模水驱的力学机制, 归纳为 3 种类型驱替方式: 活塞式排驱、孔隙体充填、以及节流.

2.2.1 活塞式排驱

如不考虑润湿滞后, 水驱时的活塞式排驱毛细管进入压力的计算公式与初次排驱时相同, 如式 (2) 所示. 由于润湿滞后的影响, 水驱时的接触角 (前进角) θ_a 大于油驱时的接触角 (后退角) θ_r , 随着毛细管压力的降低, 在角隅中油水界面的曲率半径将增大, 但是在接触角达到 θ_a 之前, 油水界面被锁定, 不能移动, 此时的接触角为 θ_h ($\theta_r < \theta_h < \theta_a$).

自发水驱的毛细管压力为正值, 因此当毛细管压力降为 0 时, 这时候的前进角为自发水驱的最大前进角, 再增大, 毛细管压力就变为负值, 成为强制水驱. 在强制水驱阶段, 如果接触角 θ_a 比较大 ($\theta_a > 135^\circ$) 时, 在水进入孔隙后, 在孔隙中间的水与角隅中的水层之间可能存在油层, 当内外两个油水界面接触时, 油层破碎.

2.2.2 孔隙体填充

在自发吸吮过程中, 填充孔隙体的毛细管进入压力 (或者临界曲率半径) 取决于已经被水填充的相邻喉道的数目. 对于一个配位数为 Z 的孔隙体, 可能出现 $Z-1$ 种不同的填充模式, 用 $I_1 \sim I_{Z-1}$ 来表示相应的填充模式以及事件. I_n 中的 n 表示该孔隙有 n 个相邻的喉道仍被油填充. 其中, I_1 孔隙体填充方式与活塞式排驱方式相同.

对于孔隙中的强制水驱 ($P_c < 0$) 的情况, 它的毛细管进入压力不依赖于已经被水填充的相邻元素的数目, 仍按活塞式排驱方式确定.

2.2.3 节流

节流是由于角隅中的水膨胀直到相邻角隅中的水层接触, 从而使孔隙、喉道很快被水填充的过程. 自发节流或强制节流通常分别发生在毛细管压力为正或为负的情况下.

3 模拟结果与讨论

建立三维网络模型, 模型尺寸 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 如图 1 所示. 图中球体代表孔隙, 线段代表喉道, 球体的大小反映出孔隙具有不同的空间尺寸. 共包含有 3359 个孔隙、6861 个喉道. 平均配位数为 4.28, 孔隙度为 28%, 绝对渗透率为 $2.23\mu\text{m}^2$, 网络模拟参数如表 1 所示.

调整模拟网络的孔隙结构参数, 利用网络模拟计算的吸吮过程油水相对渗透率曲线, 如图 2 所示. 与油水稳态相对渗透率驱替实验结果变化趋势基本一致, 验证了网络模拟的有效性. 驱替实验采用岩心绝对渗透率为 $2.28\mu\text{m}^2$, 孔隙度为 27.5%, 实验

用油黏度为 $30.6\text{ mPa}\cdot\text{s}$.

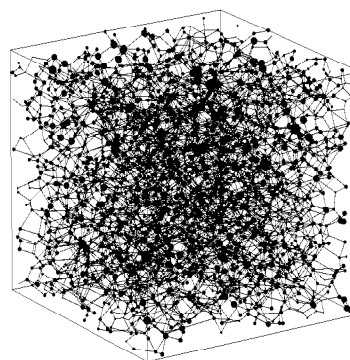


图 1 三维网络模型

Fig.1 Three-dimensional network model

表 1 网络模拟参数取值

Table 1 Basic parameters for network simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
network size	$2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$	initial contact angle	0°
pore radius	$3.5 \sim 67.5\mu\text{m}$	balance water wet	$40^\circ \sim 50^\circ$
throat radius	$0.9 \sim 52.2\mu\text{m}$	contact neutral	$85^\circ \sim 89^\circ$
throat length	$10.0 \sim 78.9\mu\text{m}$	angle oil wet	$130^\circ \sim 140^\circ$
pore-throat ratio	$1.0 \sim 7.0$	oil-water interfacial tension	30 mN/m
coordination number	4.28	water density	1.0 g/cm^3
porosity	28%	oil density	0.93 g/cm^3
absolute permeability	$2.23\mu\text{m}^2$	water viscosity	$1.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$
shale content	6%	oil viscosity	$32.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$

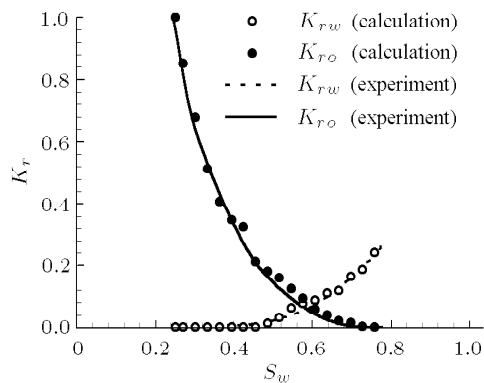


图 2 计算水驱相对渗透率曲线与实验结果对比

Fig.2 Comparison between predicted and measured waterflood relative permeabilities

分别讨论了在水湿、中性、油湿等不同润湿条件下, 水驱初期、中期和末期的剩余油微观分布规律. 其中, 水湿储层平衡接触角取值为 $40^\circ \sim 50^\circ$; 中性储层平衡接触角取值为 $85^\circ \sim 89^\circ$; 油湿储层平衡接触角取值为 $130^\circ \sim 140^\circ$. 水驱阶段的划分以平均含水饱和度为准, 岩石在吸吮过程的初始含水饱

和度为 17.8%. 定义水驱初期, 岩石平均含水饱和度在 30% 左右; 定义水驱中期, 岩石平均含水饱和度在 55% 左右; 水驱末期定义在残余油状态.

孔隙网络中剩余油分布的形式是多样的, 剩余油存在的模式可归纳为以下几种^[6]: (1) 孤粒、孤滴状. 孔隙中剩余油分布零散, 常分布在独立的孔隙中; (2) 斑块状. 部分孔隙空间充满剩余油, 呈斑块状形态分布, 剩余油局部分布在少数连通的孔隙中; (3) 网络状. 剩余油在孔隙网络中大部分空间充满, 所占据的孔隙和喉道较多; (4) 油水混合状态. 剩余油与水同存于孔隙中, 以油水共流、油包水或水包油等形式存在.

不同的分布形式存在着不同的形成机理, 也有着不同的启动条件和方式. 因此, 对剩余油分布状态进行统计分析具有一定的意义. 为了便于统计且具有一定的代表性, 对以上 4 种典型的剩余油分布形式做以下定义: 剩余油的统计在含水饱和度 $S_w < 85\%$ 的孔隙中进行. S_w 介于 15%~85% 之间孔隙中存在的剩余油认为呈油水混合状态分布; 而 $S_w < 15\%$ 的

孔喉中的剩余油依据其所占据的连通孔隙个数 n_c ，划分为孤粒 / 孤滴状 ($n_c = 1$)，斑块状 ($2 \leq n_c \leq 5$) 和网络状 ($n_c > 5$) 3 种分布形态。

统计结果可以得到如下分布规律：

(1) 将剩余油分布形态归纳为 4 种状态：孤粒 / 孤滴状、斑块状、网络状和油水混合状态。除中性储层不含有油水混合状态剩余油，只有 3 种剩余油分布形态外，水湿、油湿储层都分别含有这 4 种剩余油分布形式。

(2) 剩余油块数以剩余油占据孔隙是否被分隔开来判断，油水混合状态剩余油未统计块数。从不同分布形态剩余油块数来看，以孤粒 / 孤滴状、斑块状为主。例如水湿储层在水驱末期统计的剩余油块数为 200 个，其中孤粒 / 孤滴状、斑块状、网络状剩余油块数分别为 113, 60, 27 个，分别占总数的 56.5%, 30.0%, 13.5%。

(3) 从不同分布形态剩余油所占据孔隙数和体积比例来看，虽然网络状剩余油的块数较少，但由于单块网络状剩余油所占据的孔隙数较多 (图 3)，因此网络状剩余油所占体积比例较大。例如水湿储层在水驱初期统计的网络状剩余油块数仅为 1 个，但该块剩余油却占据孔隙 2689 个，所占体积比例为 98%。

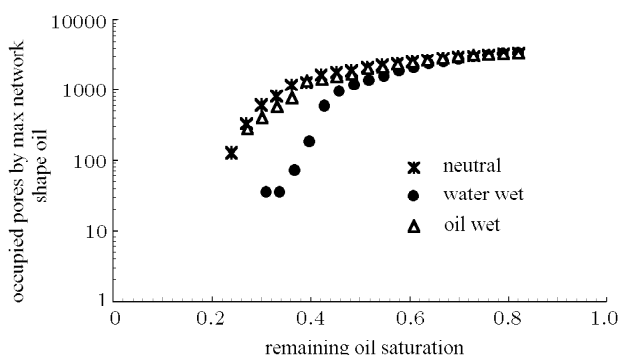


图 3 最大网油所占孔隙数与剩余油饱和度的关系

Fig.3 Occupied pores by max network shape oil vs. remaining oil saturation

(4) 润湿性影响驱油效率。在残余油状态下，水湿、油湿和中性储层的平均剩余油饱和度分别为 34%, 27%, 24%；它们的驱油效率分别为 58.6%, 67.2%, 70.8%。其中，水湿储层的驱油效率最低，而中性储层的驱油效率最高，这与文献 [7] 提供的微观实验结果是相吻合的。但也有文献提供的实验结果表明，水湿储层的驱油效率大于油湿储层的驱油效率。

(5) 润湿性同时影响剩余油分布形态，如图 4 所

示。按照本文剩余油分布状态的定义，得到以下结论：

3 种润湿储层中，水湿储层中的油水混合状态剩余油最多，例如水湿储层在水驱末期统计中，油水混合状态剩余油所占体积比例达 15.16%。在水湿储层中，水存在于岩石孔喉壁上或角隅内，原油占据孔喉中间，油水混合状态的孔喉中含水饱和度较低，剩余油较多。受此影响，水湿储层中网络状剩余油所占体积比例相对于其它润湿储层最少，但孤粒 / 孤滴状、斑块状剩余油与其它润湿储层相当。

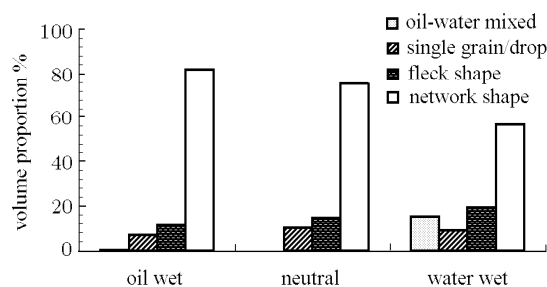


图 4 水驱末期不同润湿储层剩余油分布统计

Fig.4 Remaining oil distribution in different wet reservoir during final stage of water flooding

在油湿储层中，仅含有少量的油水混合状态剩余油。原油受润湿影响吸附于岩石孔喉壁上或存在于角隅内，而水占据孔喉中间位置，因而油水混合状态的孔喉中含水饱和度较高，所含剩余油较少。油湿储层易于形成原油通道，因此在 3 种润湿储层中，油湿储层网络状剩余油所占比例最大，而孤粒 / 孤滴状、斑块状剩余油相对最低。

中性储层不存在油水混合状态剩余油，在 3 种润湿储层中，中性储层孤粒 / 孤滴状、斑块状、网络状剩余油所占体积比例都居中。

(6) 润湿性也影响最大网络状油所占孔隙数，或者说最大块剩余油的规模 (图 3)。随着剩余油饱和度的降低，最大网络状油所占孔隙数减少。中性和油湿储层数据点趋势较一致，水湿储层该值较其它润湿条件低得多。也就是说，在水湿储层中形成的剩余油比在油湿、中性储层中的更分散。图 3 也反映出，无论储层是水湿、油湿还是中性，剩余油饱和度在 40%~50% 附近最大网络状油所占孔隙数开始以较快速度减少。说明在该含油饱和度下，剩余油已不足以在很大空间范围内连通分布，以前的剩余油大“集团”已逐步分裂为若干剩余油小“集团”，造成最大网络状油所占孔隙数的快速减少。

(7) 从不同水驱开发阶段来看, 随着时间的推移, 剩余油饱和度降低。一般地, 孤粒 / 孤滴状、斑块状和油水混合状态的剩余油所占体积比例逐渐增加, 而网络状剩余油所占体积比例逐渐减少, 总的变化趋势是剩余油分布趋于分散。

4 结 论

建立起油水两相流网络模拟模型, 通过模型计算结果与油水稳态相对渗透率驱替实验结果对比验证了网络模拟的有效性。利用逾渗网络模型在微观水平进行随机模拟来研究水驱油的微观渗流规律。水驱微观剩余油分布规律研究表明:

(1) 可将剩余油分布形态归纳为 4 种状态: 孤粒 / 孤滴状、斑块状、网络状和油水混合状态。中性储层不含有油水混合状态剩余油。

(2) 从不同分布形态剩余油块数来看, 以孤粒 / 孤滴状、斑块状为主。而从剩余油所占据孔隙数和体积比例来看, 虽然网络状剩余油的块数较少, 但网络状剩余油所占体积比例较大。

(3) 润湿性影响驱油效率、剩余油分布形态, 同时也影响最大网络状油所占孔隙数。

(4) 在驱替过程中, 剩余油分布总的变化趋势是趋于分散。

参 考 文 献

- 1 Blunt MJ, Jackson MD, Piri M, et al. Detailed physics, predictive capabilities and macroscopic consequences for pore-network models of multiphase flow. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(8-12): 1069~1089
- 2 Mason G, Morrow NR. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes. *J of Colloid and Interface Science*, 1991, 141(1): 262~274
- 3 Wilkinson D, Willemsen JF. Invasion percolation: a new form of percolation theory. *J Phys A*, 1983, 16: 3365~3376
- 4 Blunt MJ. Physically-based network modeling of multiphase flow in intermediate-wet porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1998, 20(3-4): 117~125
- 5 Lenormand R, Zarcone C, Sarr A. Mechanism of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts. *J Fluid Mechanics*, 1983, 135: 337~353
- 6 孙焕泉. 油藏动态模型和剩余油分布模式. 北京: 石油工业出版社. 2002(Sun Huanquan. Reservoir Dynamic Model and Remaining Oil Distribution Pattern. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002 (in Chinese))
- 7 Jadhunandan PP, Morrow NR. Effect of wettability on waterflood recovery for crude oil/brine/rock systems. *SPE Reservoir Engineering*, 1995, 10 (1): 40~46

WATER FLOODING MICROSCOPIC SEEPAGE MECHANISM RESEARCH BASED ON THREE-DIMENSION NETWORK MODEL¹⁾

Hou Jian^{*,2)} Li Zhenquan^{**} Guan Jiteng[†] Wang Kewen[†] Chen Yueming^{*}

^{*}(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

^{**}(Geological Research Institute, Shengli Oilfield Limited Company, Dongying 257015, China)

[†](College of Physics Science and Technology, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract Water flooding microscopic seepage mechanism was researched by stochastic simulation on percolation network model at microcosmic level. The validity of network model was testified by the comparison of simulation and experiment of water-oil relative permeability steady flooding. Then, the microscopic distribution laws of remaining oil were discussed at different stages of water flooding and at different wetting situations. The forms of remaining oil distribution were divided into single grain (or single drop) shape, fleck shape, network shape and oil-water mixed shape. Research results show that the blocks of network shape remaining oil are less than other forms while occupying more volumes. Pores with max network shape remaining oil are reduced together with the reducing of remaining oil saturation and are reduced rapidly at about forty percent to fifty percent of remaining oil saturation. Wettability not only influences sweep efficiency, but also influences remaining oil distribution. The general change tendency of remaining distribution is becoming more and more dispersive.

Key words water flooding, microscopic simulation, seepage mechanism, network model, remaining oil

Received 13 September 2004, revised 8 June 2005.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10302021).

2) E-mail: houjian@hdpu.edu.cn